 論 文

中国内モンゴルのエジナ河・居延三角州における 胡楊 (*Populus euphratica*) 林の現状と再生適地の判定

オウスチンビリゴ¹・栗屋善雄^{2,*}

Current status and regeneration area assessment of Koyo poplar (*Populus euphratica*) forests in the Kyoen Delta of the Ejina River in Inner Mongolia, China

Siqinbilige Wang¹ and Yoshio Awaya^{2,*}

オウスチンビリゴ・栗屋善雄：中国内モンゴルのエジナ河・居延三角州における胡楊 (*Populus euphratica*) 林の現状と再生適地の判定, 森林計画誌50：15～26, 2016 中国内モンゴル自治区のエジナ河・居延三角州では、1940年代から1980年代初頭にかけて胡楊（コヨウ, *Populus euphratica*）などが軍用の建材や燃料として大規模に伐採され、胡楊は絶滅危惧種に指定された。そこで、現地調査と1977年、1990年、2000年および2010年のランドサットデータの判読結果に基づいて、胡楊の分布と回復の傾向を判定し、再生適地を明らかにすることを目的とした。GISでの解析によると、2010年までに人為的な攪乱はほぼ終わって植生の回復が始まり、一部のエリアでは胡楊への遷移が進んでいた。バッファリング解析では、胡楊が河川沿いの紅柳（コウリュウ, *Tamarix ramosissima*）林へ広がるのに、最低450年を要すると予想された。約40年間で大面積の森林が伐採されたが、回復には10倍以上の年月を要することになる。しかし、胡楊と他の樹種の混植や根切りが胡楊の更新を促すことが知られている。このため、胡楊の回復が見込める川沿いの紅柳林へ効果的に胡楊を混植し、拡大が止まっている胡楊林では根切りで更新を促進して再生に要する期間を短縮できると考えられた。

Siqinbilige Wang, Yoshio Awaya: Current status and regeneration area assessment of Koyo poplar (*Populus euphratica*) forests in the Kyoen Delta of the Ejina River in Inner Mongolia, China. Jpn. J. For. Plann. 50: 15~26, 2016 In the Kyoen River Delta, trees including Koyo poplar (*Populus euphratica*) had been extensively logged for building materials and fuel wood for military use from the 1940s to the 1980s. As a result, Koyo poplar has been designated as an endangered species. Here, we determined the current distribution and recovery trend of Koyo poplar based on Landsat data obtained in 1977, 1990, 2000 and 2010. We also attempted to identify areas suitable for planting. Koryu tamarisk (*Tamarix ramosissima*) is a pioneer species along rivers and provides a protective habitat for Koyo poplar, which later becomes the climax species. A geographic information system (GIS) analysis showed that, as of 2010, human disturbance of the forest had almost ended and vegetation was recovering. Succession to Koyo poplar had started in some areas. A buffering analysis by GIS showed that it would take at least 450 years for Koyo poplar to recover in Koryu tamarisk forests. That means that the recovery would take 10 times as long as the period of disturbance. However, previous studies have shown that mixed planting of Koyo poplar and other tree species improves the growth of Koyo poplar seedlings and that root cutting improves bud blush from roots. The regeneration period for Koyo poplar could be shortened by planting Koyo poplar in Koryu tamarisk forests along rivers and by root cutting in Koyo poplar forests that had stopped regenerating.

*連絡・別刷請求先 (Corresponding author) E-mail: awaya@gifu-u.ac.jp

1 岐阜大学大学院連合農学研究科 (501-1193 岐阜市柳戸1-1)

United Graduate School of Agricultural Science, Gifu University, 1-1 Yanagido, Gifu 501-1193, Japan

2 岐阜大学流域圏科学研究センター (501-1193 岐阜市柳戸1-1)

River Basin Research Center, Gifu University, 1-1 Yanagido, Gifu 501-1193, Japan

I. はじめに

エジナ河下流域の居延三角州は中国の西北部の乾燥地の荒地帯に位置する牧業、農業、林業の盛んな地区で、中国の最大の牧業オアシスである(趙・明, 2013)。主に天然生の胡楊(*Populus euphratica*)と紅柳(*Tamarix ramosissima*)と沙棗(*Elaeagnus angustifolia*)が森林を形成し、湖の砂浜や牧草地に葦類、苦豆子(マメ科多年草, *Sophora alopecuroides*)などが分布して、植生はエジナ旗(日本の郡に相当する)の総面積の27.6%を占める(額済納旗志編纂委員会, 1998)。

居延三角州の位置するエジナ旗では気候変動に伴う気温上昇が顕著で(中尾, 2007; 顔ら, 2014; 趙ら, 2012; 劉ら, 2012), 温暖化が居延三角州の植生減少の一つの理由とされてきた。また、黒河の中流(エジナ河の上流)での耕地の増加による河川水の過剰な取水の影響で、1970年代以降の河川水の消費量の増加がエジナ河流域の深刻な水不足を招き、植生衰退の原因になったと指摘されてきた(窪田, 2007; Gong and Dong, 1998; 徐ら, 2013; 潘ら, 2006)。しかし、居延三角州では1940年代から1980年頃にかけて胡楊や紅柳の森林が大規模に伐採されたが(Cha, 2010), 1977年以降は紅柳を含む植生の面積が増加している(オウ・栗屋, 2015)。元々、エジナ旗では年降水量が約37.9 mmに対して年間の可能蒸発量が3,769.6 mmと極度に乾燥して(額済納旗志編纂委員会, 1998), 気候は植物の生育に適さない。一方、河川水は1991年から2001年にかけて減少したが回復し、地下水位は上流部で安定しているが下流部で低下し続けている(楊, 2002)。

胡楊はヤナギ科、ヤマナラシ属、コトカケヤナギ亜属の高木で、和名はコトカケヤナギといい、ヤナギ科の中で最も古い種類の一つで原始的なヤナギである(吉川ら, 2007)。胡楊は居延三角州の河岸の主要樹種であり、唯一森林を形成する高木である(戴ら, 2009)。胡楊林は居延三角州の極相であり、住民にとっては混牧場の場や畑の防風林でもあり、胡楊材は居延三角州では唯一の建材であり、燃料や製紙の原料としても利用されてきた(吉川ら, 2007)。このため、胡楊が失われると代替の建材が得られず、住民にとって不可欠の木材資源である。紅柳はギョリュウ科、タマリクス属の落葉小高木や灌木で(戴ら, 2009)、日本ではギョリュウと呼ばれる。紅柳林は居延三角州の面積の60%を占め、主に放牧地として利用されている(趙・明, 2013)。紅柳は河川沿いや氾濫原や河道の間の砂丘やゴビ(砂礫が広がる草原)などに広く分布する。沙棗はグミ科グミ属の高木と小喬木の落葉樹で和名は無い。沙棗は耐乾性が強く、胡楊と同じく防風林に用いられ、主に家畜飼料になるが建築には使えない

(額済納旗地名志, 1988)。なお、中国語の発音をカタカナに直すと、概ね胡楊はコヨウ、紅柳はコウリュウ、沙棗はサソウと記せる。

胡楊林の林床には主に紅柳、苦豆子などが出現するが、胡楊は紅柳の樹冠下で萌芽して成長し、やがて紅柳をしのいで群落を形成する。胡楊の稚樹は紅柳の樹冠下で発芽して成長するので、紅柳は胡楊にとって先駆種であるとともに、紅柳の枝が胡楊の稚樹を家畜の摂食から保護する役割を担っている(吉川ら, 2007)。居延三角州の気候は極端な乾燥気候であるため、胡楊は種子の発芽率が極めて低い(吉川ら, 2007)ことから、自然状況で種子による胡楊の再生は期待できず、植林以外に胡楊を回復させる手段は無いとされ(Cha, 2010)、胡楊と紅柳などの灌木を混植して胡楊の稚樹の成長を促進できることが知られている(額済納旗地名委員会, 1988)。一方、胡楊は水分条件が良く、塩類集積がなければ、根萌芽による更新が活発に起こり次世代林が形成されるため、根萌芽による繁殖は乾燥した荒漠ではより普遍的な繁殖方法である(吉川ら, 2007)。胡楊林の林間の空き地に沙棗を植栽して胡楊の側根の萌芽更新を促したり(孫・姚, 2000)、拡大の止まった胡楊の側根を根切りして萌芽を生じさせることができる(孫・姚, 2000; 田ら, 2009)。また、壮齢の胡楊と紅柳の根はそれぞれ深さ5 mと3 mに達し、両樹種とも地下水位が約5 m以下になると枯損が発生する(蘇ら, 2004)。このように、紅柳の存在は胡楊の生育にとって更新条件として重要で、紅柳林の存在は地下水が胡楊の生育に十分な水位であることを示していると判断される。

以上のような状況から、居延三角州でもっとも重要な樹木である胡楊の分布域の変化の実態を明らかにし、今後の保護の指針となる資料を提供することは有意義であると考えられる。上述のように居延三角州の気候は極端に乾燥していて、地下水も含めた水分条件が悪いエリアでは胡楊の再生は困難である。紅柳は胡楊の先駆種であり、両樹種とも同じような土壌水分の条件で生育できると考えられ、紅柳林の林床で胡楊の稚樹が生育できる可能性が高い。このため、胡楊が拡大して生育可能なエリアとしては、主に水分条件が良い河川沿いと紅柳林が考えられる。

オウ・栗屋(2015)は居延三角州において、現地調査に基づいて1977年、1991年、2000年と2010年の地球観測衛星ランドサット画像で土地被覆を判読し、土地被覆変化を解析して報告した。既報では、植生の変化に焦点を絞って解析し、1977年から2010年の間に森林面積が顕著に増加し、砂地と裸地およびゴビの面積が減少したことを明らかにしたが、胡楊や紅柳の分布域の変化の詳細については未解析だった。しかし、判読

カテゴリーは胡楊、紅柳などの植生と非植生の合計14カテゴリーに及び、この判読結果を利用して胡楊と紅柳の変化を解析できる。

このような背景から、本研究は居延三角州の胡楊や紅柳などについての現地調査とグーグルアース画像と1977年から2010年までのランドサット画像の判読結果（オウ・栗屋，2015）に基づいて、地理情報システム（GIS）による分析で胡楊の分布と変化の実態を明らかにし、その結果に基づいて今後の回復の難易を判断し、現在の植生分布から考えられる胡楊の再生適地を明らかにすることを目的とした。

II. 研究対象地とデータ

中国内モンゴル自治区の黒河下流のエジナ河流域に位置する居延三角州（北緯41°51′～42°22′，東経100°55′～101°24′，面積：1,445km²）を対象地として選定した（図-1）。文献により居延三角州のエリアの定義は異なるが、本研究では現在多くの住民が用いているダライ・フブ鎮（エジナ旗の政府所在地）を含む東河（ムレンゴロー）の支流で囲まれるエリア（東河の流域）とした。エジナ河は居延三角州の人々と植物にとって唯一の水源であり、狼心山水門からは、東河と西河（オリドゴロー）に分かれ、東河はソゴノール湖に注ぎ、ゴビ砂漠に入って消える（金，2010）。近年、東河の流量は比較的多く、16本の支流が居延三角州を流れ、川辺に森林が繁茂している（田ら，2009）。

対象地の気候は極端な乾燥気候で、年最高気温は

43.1℃，年最低気温は-37.6℃，平均気温は8.3℃，年平均降水量は約37.9mm，可能蒸発量は3,769.6mm，相対湿度は35%程度，年平均風速は4.4m・s⁻¹，8級（17.2m・s⁻¹，34ノット）以上の強風日数は年間52日である（額済納旗志編纂委員会，1998）。また、天然の植生としては、胡楊、紅柳、アシ（*Phragmites Adans*）などが分布し、耕地や人工林も広がっている（趙・明，2013）。

胡楊林は1940年代から1980年頃までに軍用の建築材料と燃料などとして伐採され、下流域を中心に大面積の胡楊が消失した（Cha，2010）。1980年頃から燃料は薪炭から石炭におき替わって伐採が減少した（聞き取り調査）。中国政府は1978年に「林木を主とする保護方針」を立てて、森林法を強化した。これに基づいて、エジナ旗政府は柵で土地を囲って家畜の侵入を完全に防ぐ「封育」と呼ばれる保護方法を実施した（額済納旗志編纂委員会，1998）。その後、胡楊の保護が強化されて「封育と造林を組み合わせた合理的な利用方針」を提案し、1990年に112箇所、9,340.5haの胡楊林で封育を実施した結果、乱伐採を阻止して幼齢木を家畜から守ることによって、幼齢木は良好に成長した（額済納旗志編纂委員会，1998）。1992年にエジナ旗の胡楊林のうちの958haが内モンゴル自治区の保護林区に設定され、現在まで保護活動が続いている（吉川ら，2007）。

本研究ではランドサットの4時期のデータを利用して目視判読した土地被覆分類図を解析に利用した（オウ・栗屋，2015）。4時期のデータは1977年6月11

図-1 居延三角州の黒河・エジナ河流域における地理的位置
（居延三角州の上流域，中流域，下流域の区分は著者らが便宜上設定した。）

日（ランドサット2号，マルチスペクトラルスキャナMSS），1991年6月23日（同5号，セマティックマップーTM），2000年6月14日（同7号，エンハンスドセマティックマップープラスETM+），2010年6月11日（同5号，TM）に観測された。土地被覆分類図では，植生として胡楊，紅柳，疎林，その他の林地，草地，耕地，および非植生として裸地，砂地，ゴビ，河川，湖，池，市街地，農村の14カテゴリーを分類している。面積が狭くて十分な数の検証点が得られなかった，草地，その他の林地，池を除く11カテゴリーの分類精度については *Kappa* 係数が85%で精度は高い。

Ⅲ. 研究方法

過去の胡楊の分布図や土壤水分などの立地因子の分布図が無いことから，今後の分布の拡大を正確に予測することは困難である。そこで解析は，1) 1977年から2010年の間の全域および河川から500m以内のエリアにおける各土地被覆の面積変化を集計し，2) 胡楊と紅柳の1977年時点の分布域についてのその後の時系列変化を把握し（全域），3) 胡楊と紅柳の変化パターンを把握して研究対象地での胡楊と紅柳の変化の特徴を把握する。次いで4) 河川から500mのエリアと紅柳のエリアについて胡楊からの距離を算出し，胡楊の1年間の拡大距離で除して拡大の所要年数に換算し，胡楊の拡大の難易の目安とする。そして，解析結果と胡楊の保護と再生に関する既存の情報に基づいて，胡楊の保護・拡大の方策と優先的なエリアを示す。解析には地理情報システム ArcGIS ver. 10 (ESRI 社，USA) を利用した。

1. 土地被覆の面積変化—解析対象地全域と河川から500m以内

解析対象地全域について主要な9カテゴリー（胡楊，紅柳，疎林，その他の林地，草地，耕地，裸地，砂地，ゴビ）の面積を集計して土地被覆の変化の傾向を把握するとともに，胡楊と紅柳について1977年と2010年の間の変化を図化して，拡大と減少の地域的な傾向を検討した。現在，胡楊は主に河川沿いに生えていて，河川から60mを過ぎるあたりから林床に紅柳が出現し始め，90～200m付近で高密度の群落を形成する（吉川ら，2007）。そして，胡楊は河川からおおむね500mの範囲に生育することから，河川から500mのバッファを設定し，500m以内のエリアでの胡楊と紅柳の分布域を確認するとともに，土地被覆の面積を集計して胡楊と紅柳の分布の特徴を検討した。

2. 対象全域での胡楊と紅柳の分布の変化—1977年以降の変化の追跡

1977年の胡楊あるいは紅柳を対象に1977年と1991年，1977年と2000年，1977年と2010年の判読結果の間の土地被覆ポリゴンの重なりをインターセクト解析（橋本，2012）により解析して，胡楊と紅柳の時系列的な被覆変化を検証した。前節では単純集計で変化を検証したが，本節では解析対象地全域について，1977年の胡楊と紅柳の分布域の1991年以降の変化を追跡し，変化の特徴について検討した。

3. 胡楊と紅柳の変化パターンの確認

1977年の判読結果で面積が比較的広くて判読精度が高く，この地域での変化の特徴を良く表していると考えられる胡楊と紅柳のエリアを3箇所ずつ選択した。この3箇所は，胡楊については拡大および減少したエリアと紅柳に変化したエリアの3箇所，紅柳については拡大および減少したエリアと紅柳から胡楊へ変化したエリアの3箇所である。減少は主に疎林と非植生に変化したエリアを指す。これら6箇所について，1977年から2010年までの変化の特徴を検討した。

4. 胡楊の回復傾向の判定

1977年と2010年の判読結果で，胡楊の判読精度が高いと確認されたエリアについて，胡楊が拡大した10箇所を選んで拡大距離を計測した。胡楊の分布の変化は決して大きくないことから，最初（1977年）と最後（2010年）の判読結果を利用して拡大の平均速度を求めた。場所により胡楊の拡大距離は様々であるが，本研究では拡大速度のポテンシャルを把握することを目的とし，明らかに拡大している10箇所を選んだ。手順は，まず，1977年の胡楊の各エリアの直線的な縁を基準線とした。次いで，各基準線に約60～90m間隔で4～6本の垂線を設定した。そして，基準線と2010年の判読結果での胡楊のエリアの縁までの距離を計測し（図-2），10箇所での1年間の平均値を求め，さらに10箇所の平均値を計算して1年間の拡大距離とし，これを最良の条件での拡大距離と考えた。次いで多重バッファリング（橋本，2012）によって2010年の胡楊林からの距離を計算し，これを1年間の拡大距離で除して拡大に要する年数（拡大所要年数）と読み替えて，50年間隔で胡楊の拡大所要年数をマッピングした。拡大所要年数は距離に基づく根萌芽による拡大の難易を表し，河川から500m以内のエリアの場合と，2010年の紅柳の分布域の場合の2通りをマッピングし，今後の胡楊の拡大について検討した。

以上の1～4の解析結果と既存資料に基づき，胡楊の効果的な植林の方策について検討した。以下では，

図-2 胡楊の拡大の測定方法

拡大所要年数は自然に回復する場合の距離に基づく相対的な難易を表し、植林を計画するうえでの一つの目安と考える。これと現在の胡楊と紅柳の分布および胡楊の拡大に関する知見を考慮して、胡楊の回復に適したエリアと方法について考察する。

IV. 結果と考察

1. 土地被覆の面積変化—解析対象地全域と河川から500m 以内

居延三角州では1977年以降は植生が回復し、非植生域が減少している（オウ・栗屋，2015）。面積に増減はあるものの胡楊の面積変化は小さく、紅柳は1977年から1991年の間に約54km²（32%）拡大し、疎林は2010年には約98km²（64%）拡大した（表-1）。その他の林地は面積が狭くて植生面積の変化に及ぼす影響は小さいが増加傾向で、耕地は2000年以降に著しく拡大した。植生とは対照的に裸地と砂地とゴビの面積はそれぞれ約95km²（29%）、71km²（21%）、45km²（17%）減少し、とくに裸地は面積が広いうえに、328km²から233km²へと大幅に減少した。

胡楊はおもに上流域に集中しているが河川から離れるほど減少し、1977年から2010年の間では上流域では拡大エリアと減少エリアが拮抗していた。中流域と下流域では3箇所大きく減少していることが目立った（図-3a）。3箇所のうちの2箇所は1977年から1991年

の間に減少したが、1940年から1980年頃にかけての伐採域（Cha，2010）に位置し、伐採によって減少したと考えられる。紅柳の分布は拡大しているが、大面積で減少したエリアも多く（図-3b）、耕地に転換された箇所が多い。紅柳は胡楊が分布していない中流域と下流域で拡大しているが、東部ではほとんど拡大していない。

河川から500m 以内のエリアでも、胡楊は中流域より下流側では非常に少なく、下流域ではわずかに広がるだけだった（図-4a）。中流と下流で胡楊が少ないのは、1940年代から1980年頃までの伐採（Cha，2010）によるものと考えられる。紅柳は東部には分布しないが、西部では下流で面積が狭くなるものの広く分布していた（図-4b）。1977年と2010年の判読結果を比較すると、河川から500m 以内のエリアでは胡楊に顕著な変化はないが、西部では紅柳が広がっていた（図-3，4）。

河川から500m 以内のエリアでの土地被覆を集計した結果、土地被覆の変化の特徴は次の通りだった（表-1）。1977年以降の胡楊の面積変化はわずかだった。紅柳については、1991年から2010年の間に判読面積の増減があるが、1977年から1991年の間に面積が顕著に増加し、その後、安定しつつあると考えられた。疎林は1991年以降に拡大していた。その他の林地は1991年に一旦減少したが、その後は増加した。草地は年により判読面積が増減して不安定だったが増加傾向と思われ、砂地、裸地、ゴビは一貫して減り続けた。裸地と砂地の面積は広いいため減少面積も大きかったが、減少率からは1977年から2010年にかけて裸地とゴビの減少率がそれぞれ53%、58%と顕著だった。耕地は2000年から2010年にかけての増加が著しかった。

このように河川から500m の範囲内では、胡楊の変化はわずかだったが、土地被覆の変化が顕著だった。とくに1977年では砂地と裸地はこのエリアの約40%を占めていたが、これらの被覆は減少し続け、2010年には約22%に狭まった。これに対し、1977年から2010年にかけて、紅柳と疎林などが増加し、植生が回復し始

表-1 居延三角州の土地被覆の面積

カテゴリー	全域の面積 (km ²)				河川から500m 以内の面積 (km ²)			
	1977	1991	2000	2010	1977	1991	2000	2010
胡楊（高木）	52.7	56.1	52.7	52.9	33.0	33.5	32.6	33.2
紅柳（灌木）	169.9	215.6	204.3	224.3	74.7	99.2	88.8	95.1
疎林	153.9	192.0	234.1	252.0	52.5	52.5	66.0	72.2
その他の林地	21.6	21.5	34.9	43.8	10.2	8.2	12.5	13.9
草地	20.2	11.1	33.0	16.6	6.4	6.6	17.7	13.4
裸地	328.1	305.8	271.3	233.1	66.9	48.5	39.4	31.7
砂地	332.6	308.7	286.1	261.4	59.8	58.7	49.6	38.2
ゴビ	262.7	249.5	231.1	218.2	7.7	3.9	3.5	3.2
耕地	35.3	33.8	38.6	60.9	11.2	11.1	12.1	21.4

図-3 1977年から2010年までの胡楊と紅柳の増減
(背景：1991年のランドサット TM バンド3)

図-4 河川から500m 範囲内の胡楊と紅柳の分布
(背景：a) 1977年のランドサット MSS バンド2, b) 2010年のランドサット TM バンド3)

めていた。全域および河川から500m 以内のエリアでは、疎林やゴビなどで面積が変化した時期に差が生じたが、植生が拡大して非植生が減少する傾向は同じだった。

この地域では裸地から草本、次いで灌木から疎林・紅柳、そして胡楊の順に植生が遷移すると考えられ、胡楊が極相種である（吉川ら、2007；李ら、2014）。極相種の胡楊は上流域で拡大したものの全体では面積は横ばいだったが、先駆種の紅柳や疎林は増加した。なお、植林地は南部に存在するが面積が狭くて地域が限られている。従って本研究の解析結果は、森林の攪乱後に遷移によって植生が回復していることを示していると考えられる。1980年代から保護政策により胡楊林と紅柳林を柵で囲んで家畜を休牧にしたが（額済納旗志編纂委員会、1998）、植生の生育に適した河川から500m 以内のエリアでは、その効果が上流域での胡楊の拡大や河川沿いの紅柳の拡大という形で現れたと言えよう。以上のように、現在は人為的な強い攪乱はほぼ終わり、この地域の植生が回復しつつあると判断された。

2. 対象全域での胡楊と紅柳の分布の変化—1977年以降の変化の追跡

土地被覆が大きく変化したのに対して胡楊の変化はわずかだったが（表-1）、各土地被覆の総面積の変化の集計では図-3に現れた変化の実態が分かりにくい。そこで、胡楊と紅柳の1977年の分布エリアについて1977年以降の変化を検討した。これにより、1977年時点の胡楊と紅柳がその後どの様に変化したかを確認できる。

1977年に52.4km²だった胡楊は1991年に38.4km²に減少した（表-2）。500m 以内のエリア内の面積を単純に集計した結果（表-1）では、胡楊の変化は認めにくかったが、表-2の結果は1980年頃まで伐採が続いていたこと（Cha, 2010）と合致する。1991年以降は胡楊の面積の変化はわずかだった。1991年時点で胡楊は、主に裸地、砂地、疎林に変化していた。1991年

表-2 研究対象全域の胡楊の1977年以降の変化

	変化面積 (km ²)			
	1977	1991	2000	2010
胡楊（高木）	52.4	39.2	38.7	41.4
紅柳（灌木）		1.1	1.1	0.7
疎林		3.9	4.8	4.4
その他の林地		0.7	0.5	1.7
草地		0.7	4.0	1.1
裸地		2.5	0.3	0.1
砂地		3.8	2.0	2.0
ゴビ		0.0	0.0	0.0
耕地		0.6	1.1	1.1
合計		52.4	52.4	52.4

以降の変化をみると2010年までに裸地と砂地が減って、耕地とその他の林地が増加した。1977年から1991年の間に減少した胡楊の跡地は、自然に植生が回復したエリアと人為的に耕地に転換されたエリアに分かれたことを示している。

紅柳についても面積は1977年に169.9km²だったが1991年に131.4km²に減少していた（表-3）。減少したエリアでは紅柳は1991年には疎林、次いで草地、裸地、砂地に変化し、その跡地は疎林などの自然に植生が回復したエリアと、人為的に耕地に転換されたエリアに分かれた。また、2000年以降に紅柳が増加したが、これは2001年以降に「退牧還草」と呼ばれる紅柳やザゴ（灌木、*Haloxylon ammodendron*）と周辺の植物を保護するため鉄柵で囲んで禁牧とした政策（児玉、2005）により、紅柳の再生が進んだためと考えられる。

表-3 研究対象全域の紅柳の1977年以降の変化

	変化面積 (km ²)			
	1977	1991	2000	2010
紅柳（灌木）	169.9	131.3	130.8	144.6
胡楊（高木）		2.5	2.8	1.7
疎林		13.6	13.1	10.3
その他の林地		0.7	0.5	1.7
草地		4.5	11.6	2.4
裸地		7.1	3.1	1.9
砂地		6.7	3.9	2.0
ゴビ		0.8	0.4	0.3
耕地		2.7	3.8	5.1
合計		169.9	169.9	169.9

3. 胡楊と紅柳の変化パターンの確認

このように胡楊と紅柳は1977年以降に増減している場所があることから、居延三角州での胡楊と紅柳の変化の特徴を確認した（図-5）。胡楊については、中流域のエリアA（図-1 地点A、図-5a）は1991年時点で胡楊が顕著に拡大し、その後も拡大していた。Cha（2010）によるとこの付近の胡楊は面積が広くて若齢であり、1980年代から保護区に指定されたため、保護政策の効果が現れたと考えられる。紅柳の場合、上流域のアンツ河水門近くのエリアB（図-1 地点B、図-5b）では1991年に広い範囲で疎林に変化したのが、1991年以降は紅柳が回復して2010年時では広い範囲に拡大していた。ここの紅柳は水門に近接していたため、水分条件が比較的良くて拡大できたと考えられる。

上流域のエリアC（図-1 地点C、図-5c）は1977年に胡楊が分布していたが、1991年以降は高密度の紅柳に変化し、その後は紅柳の面積がやや増加した。この地域では成木の胡楊が何らかの理由で減少したが、胡楊の稚樹は紅柳林の下で良好に成長できること（杨、2002；吉川ら、2007）、高密度の紅柳の存在は土

図-5 1977年から2010年の間での胡楊と紅柳の分布変化の例
 (背景: 1991年のランドサット TM バンド3)

壤水分の条件が比較的良好であることを示していると思われる。胡楊の稚樹が生育できる可能性が残されていると考えられる。しかしながら、胡楊の再生の可能性については現地調査を実施して判断することが必要だろう。上流域のエリアD (図-1 地点D, 図-5d) は紅柳から胡楊に変化した箇所で、1991年には紅柳は広い範囲で胡楊に変化した。この変化は植生の遷移を表していると考えられる。一部は砂地と裸地に変わったが、近年のグーグルアース画像の判読結果からは耕地開発と考えられた。

胡楊および紅柳とも下流域では減少したエリアが生じた。下流域のエリアE (図-1 地点E, 図-5e) は胡楊が1991年に広い範囲で疎林に変化し、面積は若干変化した。1991年以降も疎林のままだった。下流域のエリアF (図-1 地点F, 図-5f) は1991年では紅柳が顕著に減少し、広い範囲で疎林と裸地、砂地に変化

した。1991年以降は砂地と裸地が減少し、耕地が増えて草地が増減したが、疎林は変わらなかった。一部が畑に転換されたことから、この紅柳林の変化は開発による可能性が高い。

以上のように1980年頃まで続いた胡楊と紅柳の伐採 (Cha, 2010) はほぼ終わり、その跡地は自然に植生が回復したエリアが多く、保護政策も回復に効果的であると考えられた。地点A、Bの胡楊と紅柳は若齢で面積が広く、水分条件が比較的良好な場所に成林していることから、今後、胡楊と紅柳の遷移が進むだろう。しかし、地点EとFのような下流の森林の場合、胡楊と紅柳の面積は狭くて水分条件が悪いため、自然の再生が困難であると考えられる。

4. 胡楊の回復傾向の判定

10箇所の胡楊林で計測した33年間の拡大距離は

119.8m から1,493.8m で、平均は396.2m だった。これより胡楊の一年間の拡大距離は最小約3.6m, 最大約45.3m, 平均で約12m となった。吉川ら (2007) が拡大距離を10m と報告しており、本研究の解析結果は妥当と判断された。ただし、これは条件が良いケースの平均値で、実際には拡大していない部分が多い。本研究では年間12m 拡大すると仮定して拡大所要年数を計算したが、これは最良の条件での楽観的な判定であり、実際に回復するには判定結果以上に長い年月を要することを最初に申し添える。また、ArcGIS の多重バッファリングでは特定のエリアを対象にした距離階を計算できなかったため、下流で胡楊が離散的に分布している場所では、裸地などで隔たった他地域の胡楊からの距離階が示されて、拡大所要年数の精度が低かった。

最初に地上調査などから拡大が困難と判断したエリアを説明する。東部の砂漠地帯は放流の中止により、西南部の裸地は河川水の減少により水が行き渡らない (聞き取り調査) ため水分条件が悪化している。2010年のTMの可視チャンネルの輝度が高く (図-4b)、植生がほとんど分布していないことから、土壌が乾燥して広域で水分条件が悪いと判断した (図-6, 7ハッチング部分)。そのため、これらの地域を除いて胡楊が再生する見込みのあるエリアについて検討した。

胡楊は河川から500m 以内で林を形成することが多いこと (吉川ら, 2007) と、胡楊は紅柳林の下で稚樹

が育ち (吉川ら, 2007)、紅柳よりも根が深いことから (蘇ら, 2004)、紅柳林においては胡楊が生育できる見込みが高い。このことを勘案して、a) 河川から500m 以内のエリアと、b) 現在の紅柳林の分布域の2つのケースを設定した。

前述したように、河川から500m 以内のエリアでは、胡楊は上流域で密度が高くて面積が広いが、河川から離れるほど疎らとなり、下流ではわずかに分布するだけだった (図-3a, 4)。胡楊は居延三角州の極相種であるが、全域が胡楊林になることはなく、河辺林として成立すると言われる (吉川ら, 2007)。従って、胡楊は河川沿いに広がるのが予想される。この点を踏まえて回復の傾向について考える。胡楊が隣接して広く分布している上流域と中流域では、年間12m の速度での拡大所要年数は50年から150年と推定され比較的回復しやすい地域と考えられる。中流東部では胡楊は小面積で離散しているため、拡大所要年数は150年から350年と推定され、上流域に比べてやや回復が困難になるだろう (図-6)。

判読結果からは、500m のバッファの外側でも、胡楊は紅柳の分布域へ広がっている箇所があることを確認した。紅柳の分布域は胡楊の分布域 (図-3) より広く、河川から500m 以上離れた場所も多い (図-7)。紅柳エリアへの胡楊の拡大の可能性については以下のような特徴を指摘できる。上流域では胡楊の分布域が広くて密度が高いため早く拡大し終わり、中流域の西

図-6 胡楊の拡大所要年数 河川から500m 以内の場合 (背景: 2010年のランドサット TM バンド3)

図-7 胡楊の拡大所要年数 2010年の紅柳の分布域の場合 (背景: 2010年のランドサット TM バンド3)

部では上流域よりも拡大に時間を要するものの、紅柳の分布域が広いことから、胡楊が拡大可能なエリアは多く残されている可能性がある。下流域では胡楊林が疎なため拡大所要年数は650年に及ぶと推定され、拡大が困難と考えられる地域であり、地下水位は低下し続けて2010年には5～8mになった(楊, 2002; オウ・栗屋, 2015)。一方、壮齡の胡楊と紅柳の根はそれぞれ深さ5mと3mに達し、両樹種とも地下水位が約5m以下になると枯損が発生する(蘇ら, 2004)。このため、水条件が悪化している下流域では、紅柳が広がっていても胡楊が拡大できる見込みは低いと考えられる。この地域を除いた中流域の紅柳への胡楊の拡大所要年数は約450年と推定され、上流よりも拡大が困難なことが予想された。1940年代から1970年代末までのわずか40年間で森林は大規模に伐採されたが(Cha, 2010)、現在、回復できる見込みがあるエリアでも、回復には10倍以上の年月を要することになる。一方、河川から500m バッファ内の面積集計(表-1)では、1999年以降は胡楊も紅柳も面積の変化はわずかなことから、実際に回復するまでには推定結果よりさらに年月を要することは明白で、40年間の森林伐採がこの地域の森林生態系に大きな傷跡を残したと言える。

5. 胡楊の植林指針の検討

居延三角州は河川の水路網に位置し、河岸に最も近い所では胡楊の高木の純林が成林しているが、60mを過ぎるあたりから林床に紅柳が出現し始め、河岸から遠のくほど増えて、紅柳は高密度の群落を形成する(楊, 2002; 吉川ら, 2007)。また、紅柳林の下に胡楊の稚樹が生育すること(吉川ら, 2007)や、紅柳よりも胡楊のほうが根が深いこと(蘇ら, 2004)を参考に、胡楊が回復できる可能性を考慮して居延三角州のエリアを3つのタイプに分類する。タイプ1: 河川から500mのバッファ内の紅柳が生えているエリアで、水分条件が良く胡楊が紅柳と共生して順調に成長すると考えられる。タイプ2: 河川から500m以上離れた紅柳の広がっているエリアで、紅柳が生育していることから土壤水分の条件は比較的良好と考えられ、胡楊が生育できる可能性がある。胡楊の稚樹が生育できるほど地下水位が高ければ、植林が可能と考えられる。タイプ3: 河川から500m以内だが紅柳が生えていないエリアは土壤水分の条件が不良な可能性がある。胡楊を植林できるか否かは今後の植生の回復状況から判断することになるだろう。当面は回復の見込みが最も高いタイプ1のエリアで胡楊の拡大を促し、植林に務めることが適切である。

胡楊林の育成については、以下の点を指摘できる。

胡楊が隣接している紅柳のエリアでは、胡楊が根萌芽によって自然に拡大している林分(吉川ら, 2007)を保護し、胡楊の拡大が止まっている林分では沙藁の植栽や根切りによって萌芽更新を促す(孫・姚, 2000; 田ら, 2009)ことが考えられる。一方、胡楊林に隣接していない紅柳林では、胡楊の種子の発芽率が極めて低い(吉川ら, 2007)ことから、他の樹種との混植で胡楊を回復させる(額済納旗地名委員会, 1988)ことになる。

このため、ランドサット画像の判読結果に基づいて、河川沿いで胡楊が拡大しているエリア、拡大が止まっているエリアと紅柳林のエリアを判定し(図-3, 7)、それぞれ、胡楊の保護の充実、根切りによる萌芽更新、混植による胡楊の稚樹の育成による再生計画を立案することが有効と考えられる。とくに胡楊から遠く離れて拡大所要年数が大きい河川沿いの面積の広い紅柳林(図-7)に胡楊を植栽して、新たな拡大の起点を生み出すことが、居延三角州に胡楊を再生させる効果的な手段と考えられる。一例を挙げると、シラノール湖の東北部と地点Dの北側は紅柳の疎林が広がるが(図-1, 6, 7)、胡楊林から離れているため、胡楊の回復が遅いと判断した場所である。立地条件から両地点とも水分条件が比較的良好と考えられるため、このような紅柳林に胡楊を植栽することが胡楊林の拡大には効果的だろう。

以上のように居延三角州では植生遷移と胡楊回復の徴候が現れているが、根萌芽に頼る拡大では回復に400年以上の長い期間を要すると予想された。植林は胡楊の回復に重要な役割果たし、効果的な保護と植林の計画を立案して実行することが、胡楊の回復に必要なである。

V. まとめ

本研究では、居延三角州における現地調査と1977年から2010年までのランドサットデータの判読結果(オウ・栗屋, 2015)を用いて胡楊と紅柳の分布の実態を明らかにし、胡楊の回復傾向を判定して再生適地を示した。その結果は、現在、この地域で人為的な攪乱はほぼ終わり植生が回復しつつあること、さらに、紅柳から胡楊への変化が生じた一部のエリアでは、胡楊の再生が進んでいることを示していた。今後、胡楊が河川沿いの紅柳林へ広がるのに、400年以上の長い年日を要することが予想され、過去の伐採が居延三角州の植生に多大な影響を及ぼしたことが示唆された。しかし、胡楊と様々な種類の灌木を混植することが胡楊の成長に効果的なことが知られており、胡楊が隣接しない紅柳林へ植林することが、効果的に胡楊の回復

を促進して、胡楊の再生を実現する効果的な方法と考えられた。また、拡大が止まっている胡楊林には根切りで更新を促すことが指針として考えられた。ランドサット画像の判読結果は根切りや植林の候補地を選定するのに有効と期待される。本研究では、植生分布の現状と、これまでの回復の実態に基づいて胡楊の再生について検討したが、今後は、水分環境などの環境要因を加えて、多面的に検証する必要があるだろう。

謝 辞

画像による GIS データの解析には、流域圏科学研究センターの研究員の後藤誠二郎氏、留学生のハウウイリス氏、アラタンナブチ氏に助言していただいた。さらに、鹿児島大学農学部芝山道郎教授から貴重なコメントと内モンゴル師範大学の包玉龍博士から解析方法について貴重なコメントを頂いた。また、文献資料の収集について、内モンゴル師範大学の包玉海教授の助力に対し、深くお礼を申し上げる。

引用文献

- Cha, Saijirah. (2010) Ezenii tooroin tobciyan (エジナの胡楊の歴史). (Cha, Saijirah 編著 (2010). Ezenii tooroin soyol (エジナの胡楊の文化). 168pp, 内蒙古文化出版社, 呼倫貝爾.) : 1-32. (in Mongolian).
- 戴晟懋・孟和・高潤宏. (2009) 荒漠绿洲额济纳胡楊与怪柳生态位分异过程研究 (荒漠オアシスのエジナの胡楊と紅柳の生態における研究). 干旱区资源与环境 23(4) : 179-183. (in Chinese with English abstract).
- 额济纳旗地名委员会 (1988) baigali gazarzuin bodit biy (自然と地理). (巴拉虎編著 (1998) 额济纳旗地名志. 318pp, 内蒙古日报青年出版社, 呼和浩特.) : 155-177. (in Mongolian).
- 额济纳旗志编纂委员会編著 (1998) 地理 (地理). 844pp, 方志出版社, 北京 : 63-110. (in Chinese).
- Gong, J. and Dong, G. (1998) Environmental degradation of the Ejina Oasis and comprehensive rehabilitation in the lower reaches of the Heihe River. Journal of Desert Research, 18 : 44-49.
- 金晓媚 (2010) 黑河下游额济纳绿洲荒漠植被与地下水位埋深的定量关系 (黑河下流域被覆及び地下水位関係). 地学前缘 17(6) : 181-186. (in Chinese with English abstract).
- 橋本雄一 (2012) バッファ. (橋本雄一編 (2012) GIS と地理空間情報 — ArcGIS10 とダウンロードデータの活用. pp174. 古今書院, 東京.) : 83-90.
- 児玉香菜子 (2005) 「生態移民」による地下水資源の危機 — 内モンゴル自治区アラシャン盟エゼネ旗における牧畜民の事例から. (小長谷有紀・シンジルト・中尾正義編著 (2005) 中国の環境政策, 生態移民. 311pp. 昭和堂, 京都.) : 56-76.
- 窪田順平 (2007) 黒河流域の自然と水利用. (中尾正義・フフバートル・小長谷有紀編著 (2007) 中国辺境地域50年黒河流域の人びとから見た現代史. 211pp, 東方書店, 東京.) : 17-40.
- 李小琴・张小由・高冠龙 (2014) 额济纳绿洲荒漠化过程中植物群落生态学特性研究 (エジナオアシスの砂漠化における植生群落生態学特徴の研究). 干旱区资源与环境 28(8) : 66-70. (in Chinese with English abstract).
- 刘蔚・马骏・席海洋・刘东琳・常宗强 (2012) 黑河下游额济纳绿洲土地生产潜力的动态变化及影响因素分析 (黒河下流域エジナオアシスの土地生産力の変化及び影響要因分析). 冰川冻土 34(6) : 1336-1345. (in Chinese with English abstract).
- 中尾正義 (2007) 黒河流域の水不足問題とカラホト研究. (沉卫荣編著 (2007) 黑水城人文与环境研究. 637pp, 中国人民大学出版社, 北京.) : 128-136.
- オウスチンビリゴ・栗屋善雄 (2015) 中国内モンゴルのエジナ河・居延三角州における土地被覆変化の特徴. システム農学会 31(3) : 67-79.
- 潘世兵・路京选・张建立・孙涛 (2006) 黒河流域额济纳绿洲生态保护措施及其效应分析 (黒河流域のエジナオアシスの生態保護対策及び成果分析). 地理与地理信息科学 22(3) : 106-112. (in Chinese with English abstract).
- 苏建平・仵彦卿・黎志恒・温小虎・张应华 (2004) 黑河下游河岸绿洲区包气带土壤水分与植被生长状况的研究 (黒河下流域河岸のオアシスにおける通気帯の土壤水分及び植生の成長状況に関する研究). 西北植物学报 24 : 662-668. (in Chinese with English abstract).
- 孙洪祥・姚云峰 (2000) 额济纳绿洲胡楊林更新复壮技术研究干旱区资源与环境 (エジナオアシスの胡楊林の更新回復技術に関する研究). 14(5) : 69-73. (in Chinese with English abstract).
- 田永祯・司建华・程业森・赵菊英・白莹 (2009) 荒漠河谷胡楊残林复壮更新试验 (荒漠河谷の胡楊の残留林の回復及び更新に関する実験). 研究干旱区资源与环境 23(9) : 155-159. (in Chinese with English abstract).
- 顔耀文・姜海兰・王学强・马宗义・陈云海 (2014) 1963-2012 年黑河下游额济纳绿洲的时空变化 (1963-2012 年における黒河下流域エジナオアシスの経時

- 変化). 干旱区地理37(4): 786–792. (in Chinese with English abstract).
- 徐永亮・于静洁・王平・闵雷雷 (2013) 额济纳三角洲地下水位年内动态变化特征分类分析 (エジナオアシスの地下水位の年間変化特徴の分類分析). 干旱区资源与环境27(4): 135–140. (in Chinese with English abstract).
- 杨柄禄 (2002) 土壤与植被 (土壤と被覆)・冰川与湖泊 (氷河と湖). (阿拉善盟黑河工程建设管理局主编著 (2002) 额济纳河. 203pp, 阿拉善盟黑河工程建设管理局, 阿拉善.) : 1–31. (in Chinese).
- 吉川賢・門田有佳子・三木直子・石井義朗・坂本圭児 (2007) 黒河流域における胡楊 (*Populus euphratica*) 林の保全について. (沉卫荣編著 (2007) 黒水城人文与环境研究. 637pp, 中国人民大学出版社, 北京.) : 212–237.
- 赵敏丽・刘普幸・朱小娟・张克新 (2012) 黒河下游绿洲胡杨物候期对1960~2010年气候变暖的相应 (黒河下流域オアシスの胡楊の生物季節変化及び1960~2010年の気候温暖化との相関). 西北植物学报32(10): 2108–2115. (in Chinese with English abstract).
- 赵雪・明永飞 (2013) 黒河分水后额济纳绿洲怪柳 (*Tamarix ramosissima*) 和苦豆子 (*Sophora alopecuroides*) 群落的恢复 (黒河の配水によるエジナオアシスの紅柳や苦豆子の群落回復). 中国沙漠33(6): 1684–1691. (in Chinese with English abstract).
- (2015年8月7日受付)
(2016年3月1日受理)